

Harmonogramowanie realizacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem buforów czasu wyznaczonych na podstawie analizy ryzyka

Mieczysław Połoński¹

¹ *Katedra Geoinżynierii, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, e-mail: mieczyslaw_polonski@sggw.pl*

Streszczenie: Zaproponowana w artykule metodyka przygotowywania harmonogramów budowlanych wynika z próby połączenia dwóch niezależnych podejść w celu zwiększenia prawdopodobieństwa dotrzymania planowanych terminów w harmonogramach sieciowych w trakcie realizacji robót budowlanych. Analiza ryzyka planowanego przedsięwzięcia budowlanego pozwoli wskazać zadania, które są najbardziej zagrożone przekroczeniem przewidywanych czasów ich trwania. Zastosowanie buforów czasu, ich właściwa lokalizacja w harmonogramie oraz wyznaczenie wielkości czasu ich trwania z uwzględnieniem przewidywanego ryzyka wystąpienia opóźnień, pozwolą skonstruować harmonogram, zawierający uzasadnione rezerwy czasu rekompensujące ewentualne opóźnienia. Tak opracowany harmonogram może stanowić zarówno wiarygodną podstawę wyznaczenia przewidywanego terminu zakończenia prac na budowie, jak również zarządzania tymi robotami w okresie ich realizacji.

Słowa kluczowe: harmonogramy sieciowe, bufor czasu, analiza ryzyka, metoda Goldratta, ścieżka krytyczna, kontrola realizacji.

1. Wprowadzenie

Od kilku lat coraz szersze zainteresowanie w planowaniu przedsięwzięć budowlanych budzi metoda Critical Chain Scheduling and Buffer Management (CC/BM) [1,2,3,4]. Bazuje ona na tradycyjnych harmonogramach sieciowych, jedno lub dwupunktowych, [5,6], jednak wprowadza kilka dodatkowych elementów, zaproponowanych przez E. Goldratta i znanych jako tzw. Theory of Constraints (TOC) [7]. Najważniejszymi z nich jest radykalne skrócenie czasu planowanych czynności oraz równoczesne wprowadzenie tzw. buforów czasu, stanowiących rezerwę czasu zabezpieczającą dotrzymanie wyznaczonego terminu.

Twórca tej idei, E. Goldratt zaproponował dwa rodzaje buforów: zasilające, zlokalizowane na końcu ciągów niekrytycznych w miejscu ich połączenia ze ścieżką krytyczną (a dokładniej ciągiem nazywanym łańcuchem krytycznym, który jednak w przypadku analizy tylko w funkcji czasu pokrywa się ze ścieżką krytyczną) i jeden bufor projektu zlokalizowanego na końcu ścieżki krytycznej. Dodatkowo zostało przyjęte założenie, że skrócenie zadań w harmonogramie i wprowadzenie buforów nie powinno zmienić przebiegu ścieżki krytycznej. Jednak wg badań autora i K. Pruszyńskiego [8,9], w przypadku rozbudowanych harmonogramów obiektów budowlanych, liczących często po kilkaset zadań, w celu utrzymania niezmiennego położenia ścieżki krytycznej konieczne jest zastosowanie dodatkowych rodzajów buforów: wspomagających (oznaczanych symbolem BWP) zlokalizowanych na ścieżce krytycznej oraz reagujących zlokalizowanych na rozwidleniach ciągów krytycznych (BRK) lub niekrytycznych (BRN). Dokładny opis lokalizacji i sposobu wyznaczania ich wielkości (nazwany metodą MP-KP) zostały przedstawione w pracach tych autorów [8,9,10]. Analizując sposób wyznaczania czasu stosowanych buforów wg wspomnianej metodyki [8,9,10] łatwo jest zauważyć, że ich wielkość na założonym poziomie prawdopodobieństwa zakończenia danego ciągu zależy wyłącznie od dwóch parametrów: czasu trwania zadań chronionych danym buforem i parametrów rozkładu tego czasu. Czym czasy trwania zadań i rozrzut szacowanego czasu jest większy, tym większe powinny być odpowiadające im bufor. Metoda nie umożliwia

uwzględniania w obliczaniu wielkości buforów żadnych czynników ryzyka, co ogranicza zakres jej stosowania.

Z drugiej strony coraz intensywniej rozwijane są badania nad uwzględnieniem elementów ryzyka w harmonogramach budowlanych [11,12,13]. Zazwyczaj obejmuje ona mniej lub bardziej szeroki wachlarz czynników, które mogą potencjalnie wpływać na planowany przebieg robót. Interesujący przykład takiej metody, nazwanej MOCRA (Method of Construction Risk Assessment) został zaproponowany przez Skorupkę [14]. Ukazuje ona technikę kompleksowej identyfikacji i oceny ryzyka na poziomie poszczególnych zadań harmonogramu oraz całego przedsięwzięcia w funkcji czasu oraz kosztu. Metoda ta umożliwia opracowanie szeregu zmodyfikowanych wariantów uzależnionych np. od redukcji niektórych czynników ryzyka. Efektem każdego wariantu jest sumaryczny czynnik ryzyka (wyrażony w %, odrębnie dla czasu i kosztu) przypisany do każdego zadania w harmonogramie indywidualnie, przedstawiający kompleksową ocenę zagrożenia z powodu szeregu analizowanych czynników. Takie ujęcie zagrożenia wydłużenia realizacji zadań na pewno jest pełniejsze i bardziej wiarygodne niż zastosowane w metodzie MP-KP. Niestety, wyznaczone wartości ryzyka nie są zastosowane do wyznaczenia wielkości buforów czasu (których metoda MOCRA w ogóle nie przewiduje), a jedynie do wyznaczenia rozkładu prognozowanego terminu i kosztu zakończenia poszczególnych zadań i całego przedsięwzięcia z uwzględnieniem wpływu analizowanych czynników ryzyka. Tym samym metoda ogranicza się do prognozowania czasu i kosztu, nie dając wykonawcy narzędzia do zarządzania realizacją planowanego obiektu. A przecież jak celnie zauważył G. Masterton "Problem nie polega na tym, by przewidzieć przyszłość, lecz raczej na tym, aby kontrolować wydarzenia, które mają na nią wpływ" [15].

W artykule przedstawiono założenia metody opracowania harmonogramu robót budowlanych, która uwzględniałaby równocześnie wybrane elementy obu wspomnianych wcześniej rozwiązań, a więc metody MOCRA i MP-KP.

2. Założenia proponowanej metody

Zaproponowany sposób budowy harmonogramu, który będzie zawierał równocześnie ocenę ryzyka i sposób kompensowania jego wpływu na przebieg robót, opiera się na następujących założeniach:

- podstawą analizy i końcowym jej efektem jest harmonogram sieciowy przedsięwzięcia budowlanego (jedno lub dwupunktowy);
- analiza ryzyka zostanie opracowana w funkcji czasu;
- końcowy harmonogram będzie zawierał bufor czasu, stanowiące element zabezpieczenia dotrzymania planowanego terminu zakończenia;
- w zależności od etapu planowania oraz potrzeb i wymagań planisty, dopuszcza się zmianę przebiegu ścieżki krytycznej w harmonogramie finalnym w stosunku do harmonogramu wyjściowego;
- rodzaje wprowadzonych do harmonogramu buforów zostaną przyjęte na podstawie metody MP-KP;
- lokalizacja buforów zostanie przyjęta na podstawie metody MP-KP z ewentualnymi zmianami, wynikającymi z dopuszczenia zmiany przebiegu ścieżki krytycznej;
- ewentualne skrócenie wyjściowych czasów trwania zadań zostanie dokonane, w zależności od danych jakimi dysponujemy, na podstawie oceny optymistycznej (w przypadku trzy parametrycznej oceny czasu trwania zadania, a więc optymistycznej, pesymistycznej i najbardziej prawdopodobnej), założonego rozkładu czasu trwania zadania lub oceny ekspertów;
- w przypadku planowania skrócenie wyjściowego czasu trwania zadań, skrócenie będzie uwzględniało możliwości technologiczno – organizacyjne wykonania danego zadania;
- w przypadku istnienia dyrektywnego terminu zakończenia przedsięwzięcia będzie on obligatoryjny przy wyznaczaniu skrócenia zadań w korelacji z wielkością buforów;
- sumaryczna rezerwa czasu (SRC), jaką możemy przeznaczyć na bufor leżące na

ścieżce krytycznej, może być, w zależności od konkretnych uwarunkowań analizowanego przedsięwzięcia, obliczona na podstawie metody MP-KP lub oceny ryzyka przedsięwzięcia z uwzględnieniem ewentualnego terminu dyrektywnego;

- czasy trwania poszczególnych buforów zostaną obliczony na podstawie wyników analizy ryzyka chronionych ciągów wyznaczonych metodą MOCRA;
- suma czasów buforów leżących na ścieżce krytycznej będzie równa wyznaczonej wcześniej sumarycznej rezerwie czasu (SRC).

3. Dyskusja przyjętych założeń

Wykonując harmonogram końcowy planowanego przedsięwzięcia wg zaproponowanych założeń należy rozważyć kilka ważnych aspektów, które wpłyną na wynik i przebieg obliczeń. Po pierwsze należy rozważyć, co jest celem planisty: wyznaczenie terminu zakończenia przedsięwzięcia (ewentualnie terminu na określonym poziomie prawdopodobieństwa), sporządzenie harmonogramu który w przyszłości będzie stanowił podstawę bieżącego zarządzania realizacją obiektu czy wykonanie analizy ryzyka planowanego przedsięwzięcia. Osiągnięcie każdego z tych celów wymaga dostępu do różnych danych i nieco innego sposobu przeprowadzania analiz. Z punktu widzenia proponowanej metody celem jest sporządzenie harmonogramu z uwzględnieniem analizy ryzyka, który będzie mógł stanowić podstawę zarządzania i kontrolowania realizacji przebiegu robót na budowie. Naturalnie równocześnie zostanie wyznaczony planowany termin zakończenia robót, jak i poszczególnych jej etapów.

Bardzo ważną kwestią jest, na jakim etapie przygotowania obiektu do realizacji i jakimi materiałami dysponuje planista, przystępując do sporządzenia harmonogramu wg zaproponowanej metody. Najczęściej występują dwie sytuacje: planowanie rozpoczynamy od gromadzenia danych na temat obiektu, technologii jego wykonania, zasobów którymi dysponuje wykonawca itp. czyli planista sam opracowuje czasy trwania zadań i wstępną wersję harmonogramu. W takiej sytuacji wprowadzenie buforów w taki sposób, aby dopuścić zmianę wstępnego przebiegu ścieżki krytycznej nie powinno stanowić problemu. Co innego, gdy planista otrzymuje wstępny harmonogram sporządzony np. przez przyszłego wykonawcę. Należy wówczas ustalić, czy odbiorcy końcowego harmonogramu zależy na utrzymaniu już ustalonego wstępnego przebiegu ścieżki krytycznej, czy też nie. Jeżeli z różnych względów zależy mu na pozostawieniu przebiegu ścieżki krytycznej bez zmian, wówczas bufor czasu należy wprowadzić w sposób ściśle zaproponowany w metodzie mp_kp, który pozwoli na utrzymanie niezmiennego przebiegu ścieżki krytycznej. Jedynym powodem, który może to uniemożliwić jest konieczność uwzględnienia ograniczeń technologiczno-organizacyjnych przy skracaniu czasów poszczególnych zadań.

Kolejne pytanie, na które musimy znać odpowiedź, to czy został wyznaczony termin dyrektywny zakończenia robót (długość okresu realizacji). Jeżeli taki termin istnieje (np. wykonawca podpisał już umowę na wykonanie robót) i nie jest on późniejszy od terminu z harmonogramu wstępnego, determinuje to potrzebę skrócenia wstępnych czasów zadań w celu wprowadzenia buforów czasu i/lub szacowanych opóźnień z tytułu analizy ryzyka. Pozostawienie oszacowań czasów zadań z wstępnego harmonogramu bez zmian (zwłaszcza na ścieżce krytycznej) z równoczesną koniecznością utrzymania terminu dyrektywnego wyklucza praktycznie możliwość opracowania harmonogramu z uwzględnieniem analizy ryzyka i/lub buforów. Należy zauważyć, że przeprowadzona analiza ryzyka zaproponowana w metodzie MOCRA, z definicji zakłada wydłużenie wstępnego terminu zakończenia robót. Jednak w przypadku braku możliwości wydłużenia tego terminu, opracowany harmonogram z elementami ryzyka nie będzie przydatny wykonawcy w trakcie prowadzenia robót. Oczywiście, nadal cenne będzie zwrócenie uwagi na istniejące zagrożenia oraz oszacowane wielkości wydłużenia poszczególnych zadań, jednak obliczone terminy realizacji zadań nie będą mogły być przyjęte za podstawę zarządzania budową, gdyż już na wstępie przekraczają istniejący termin dyrektywny zakończenia całości robót.

Ostatnie, ważne z punktu widzenia proponowanej metody, pytanie łączy się ze sposobem szacowania czasu zadań. Praktycznie mogą wystąpić trzy sytuacje: przyjęto jedną ocenę czasu (deterministyczną), oszacowano trzy czasy (pesymistyczny, optymistyczny i czas najbardziej prawdopodobny) czyli przyjęto rozkład czasu zadania

beta (symetryczny lub asymetryczny) lub przyjęto inny rozkład czasu zadania i jego parametry (np. normalny, log-normalny, trójkątny itp.). Jeżeli chcemy szacowanie terminu zakończenia przedsięwzięcia wyznaczyć na określonym poziomie prawdopodobieństwa i/lub czasy buforów określić zgodnie z metodą MP-KP, niezbędna jest znajomość wariancji czasu poszczególnych zadań. W przeciwnym razie skrócenia zadań i wielkości buforów trzeba będzie wyznaczać w przybliżeniu, np. procentowo. W przypadku wyznaczania wielkości buforów czasu na podstawie wyników analizy ryzyka rozkład czasu zadań jest mniej istotny, natomiast pojawia się pytanie, do której oceny czasu odnieść ewentualne wydłużenie zadania ze względu na przyjętą ocenę ryzyka. Jeżeli dysponujemy oceną deterministyczną sprawa jest oczywista. W pozostałych przypadkach istnieje szereg różnych możliwości. Np. w metodzie MOCRA autor wyznaczoną ocenę ryzyka odniósł do czasu pesymistycznego. Wydaje się, że nie jest to najkorzystniejsze rozwiązanie. Przecież z założenia, wyznaczając czas pesymistyczny zadania, uwzględnia się pewne niekorzystne okoliczności w przebiegu robót (choć bez ich identyfikowania i szacowania). Przyjmowanie więc za punkt odniesienia do oceny wpływu ryzyka na czas trwania zadania czasu już obciążonego pewnym ryzykiem powoduje dublowanie tej oceny. Bardziej uzasadnione byłoby odniesienie oceny ryzyka do czasu najbardziej prawdopodobnego, mediany tego czasu czy oceny czasu o założonym poziomie prawdopodobieństwa między 0,5 a 0,9, i takie rozwiązanie proponuje się w prezentowanej metodzie.

W zależności od celu, danych którymi dysponuje planista oraz różnego rodzaju uwarunkowań na rys. 1 zaproponowano sposób postępowania przy opracowywaniu harmonogramu wg opisanych powyżej założeń. Górna część rysunku, zawierająca strzałki przerywane, dotyczy głównie rozpoznania danych, którymi dysponujemy. Dalsze część dotyczy przebiegu prowadzenia obliczeń. W schemacie starano się zawrzeć większość potencjalnych dróg postępowania, przy czym pogrubionymi strzałkami zaznaczono preferowany sposób postępowania, w zależności od celu planowania i danych, którymi dysponuje planista. Założono, że głównym celem jest skonstruowanie harmonogramu, który będzie mógł stanowić podstawę zarządzania budową, będzie zawierał bufor czasu, a ich wielkość oraz czasy wykonania planowanych zadań zostaną wyznaczone na podstawie wyników analizy ryzyka. Termin zakończenia całego przedsięwzięcia zostanie ustalony tak, aby w razie potrzeby uwzględniał istniejący termin dyrektywny, a sumaryczny czas możliwy do rozdzielenia na bufor będzie zależał od przyjętego terminu zakończenia i możliwości skrócenia zadań, głównie na ścieżce krytycznej.

4. Posumowanie

Zaproponowana w artykule metodyka wynika z próby połączenia dwóch niezależnych podejść do zwiększenia prawdopodobieństwa dotrzymania planowanych terminów w harmonogramach sieciowych. Z jednej strony wykonana analiza ryzyka planowanego przedsięwzięcia budowlanego pozwoli wskazać zadania, które są najbardziej zagrożone przekroczeniem przewidywanych czasów ich trwania. Z drugiej strony zastosowane bufor czasu, właściwie zlokalizowane w harmonogramie oraz o wielkościach czasu uwzględniających przewidywane ryzyko wystąpienia opóźnień, pozwolą skonstruować harmonogram, uwzględniający przewidywane zagrożenia przekroczenia planowanych czasów trwania zadań. Tak opracowany harmonogram może stanowić zarówno wiarygodną podstawę wyznaczenia przewidywanego terminu zakończenia prac na budowie, jak również zarządzania tymi robotami w okresie ich realizacji.

Warto również zauważyć, że takie podejście do analizy ryzyka planowanego przedsięwzięcia budowlanego mogłoby uprościć jej wykonanie. Otóż zamiast wykonywać ocenę ryzyka dla każdego zadania indywidualnie w całym harmonogramie, jak zaproponowano to w metodzie MOCRA (co dla większych harmonogramów bez wątpienia jest bardzo uciążliwe i pracochłonne), wystarczy ją wykonać zbiorczo, dla całych ciągów zadań chronionych poszczególnymi buforami. Biorąc pod uwagę fakt, że często ciągi takich zadań są jednorodnie technologicznie (np., ciąg robót ziemnych, betonowych, murarskich itp.) może to znacznie uprościć i skrócić przeprowadzenie poprawnej analizy ryzyka z uwzględnieniem realnych uwarunkowań występujących na budowie.

4. Steyn H. An investigation into the fundamentals of critical chain project scheduling. *International Journal of Project Management* (2000) Vol. 19, 363-369.
5. Połoński M. Harmonogramy sieciowe w robotach inżynierskich. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2009.
6. Połoński M. Planowanie realizacji inwestycji melioracyjnych w funkcji czasu i środków na podstawie harmonogramów sieciowych. Wydawnictwo SGGW, 1995.
7. Goldratt E. Łańcuch krytyczny. Wyd. WERBEL, Warszawa, 2000.
8. Połoński M., Pruszyński K. Lokalizacja buforów czasu w metodzie łańcucha krytycznego w harmonogramach robót budowlanych (cz. I) - podstawy teoretyczne. *Przegląd Budowlany* (2008) No. 2, 45-49.
9. Połoński M., Pruszyński K. Lokalizacja buforów czasu w metodzie łańcucha krytycznego w harmonogramach robót budowlanych (cz. II) – praktyczne zastosowanie. *Przegląd Budowlany* (2008) No. 3, 55-62.
10. Pruszyński K. Metoda harmonogramowania realizacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem buforów czasu. Rozprawa doktorska, Warszawa, 2012.
11. Skorupka D., Hastak M. Identification and Analysis of Risk Indicators of an Increase in Construction Project Costs. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej* 602, Budownictwo Lądowe, Nr 59 (2006), KILiW PAN, Krynica, 223- 230.
12. Skorupka D. Method of planning construction projects taking into account risk factors. *Operations Research and Decision* (2009) Wrocław, 119-128.
13. Skorupka D. The method of identification and quantification of construction projects risk. *Archives of Civil Engineering* (2005), Warszawa, LI, 4, 647-662.
14. Skorupka D. Metoda identyfikacji i oceny ryzyka realizacji przedsięwzięć budowlanych. Wojskowa Akademia techniczna, Warszawa, 2007.
15. Masterton G. Krzywa Sweetmana. Wydawnictwo Replika, 2011.

Scheduling of building projects taking into account the time buffers determined on the basis of risk analysis

Mieczysław Połoński¹

¹ *Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW, e-mail: mieczyslaw_polonski@sggw.pl*

Abstract: The methodology of development of building project schedules, proposed in the article, is based on an attempt to combine two independent approaches in order to increase the probability of fulfillment of time limits planned in the CPM schedules during the performance of construction works. The analysis of the risk associated with the planned building project will allow for the determination of those tasks which are most threatened by the exceeding of the planned duration time. The application of time buffers, their proper location in the schedule and the determination of their duration, taking into account the expected risk of delays, allow to develop the schedules that contain the appropriate time reserves to compensating for the possible delays. Such a schedule may serve not only as a reliable basis for the determination of the expected deadline for completion of construction works, but also for the management of these works during performance. Selected components of MOCRA and MP-KP methods were proposed in the article.

Keywords: CPM schedule, project buffer, risk analysis, Goldratt's method, critical path, progress work monitoring.